PROPOSTA DE CARTUCHO SENSOR EM PAPEL COM DETECÇÃO COLORIMÉTRICA E MEMÓRIA VISUAL DE VAZAMENTOS DE LÍQUIDOS

Daniel Ferreira Vilela, Gabriela de Oliveira Cesar, Maria Eduarda Alcântara Antonini da Paz, Matheus Luiz Moreira do Amaral, Kemer Neves Zuri

Colégio Técnico 'Antônio Teixeira Fernandes', Colégio Univap – Unidade Centro. Rua Paraibuna 78. Jardim São Dimas – 12245-020 – São José dos Campos – SP, Brasil, ferreiraddaniel8@gmail.com, gabrielacesar08@gmail.com, meaapaz@gmail.com, matheusluizmoreiraa@gmail.com, kemerzuri@gmail.com

Resumo

A detecção de vazamentos em sistemas de condução e armazenamento de líquidos é importante para reduzir perdas de materiais, danos a equipamentos e impactos ambientais. Este trabalho propõe um modelo conceitual de cartucho sensor portátil em papel para detecção colorimétrica de vazamentos em pontos específicos. O dispositivo utiliza a capilaridade para conduzir o líquido até o papel reagente, onde ocorre uma alteração de cor indicativa de propriedades ou analitos, conforme o sistema reagente empregado. A estrutura foi planejada de forma modular, com corpo principal reutilizável, cápsula sensora descartável e tampa transparente. Como diferencial, foi prevista uma região de memória visual inspirada no estudo de Han, Liu e Yin (2014), que utilizou cadeias de nanopartículas de ouro para produzir uma alteração óptica persistente. No presente projeto, a permanência dessa resposta ainda deverá ser validada experimentalmente. Como resultado, obteve-se uma proposta compacta, modular e adaptável, cuja eficiência, seletividade e estabilidade deverão ser avaliadas na construção física do protótipo.

Palavras-chave: Sensores em papel. Sensores colorimétricos. Detecção de vazamentos. Cartucho sensor. Registro visual.

Curso: Técnico em Química.

Introdução

A detecção de vazamentos em sistemas de condução e armazenamento de líquidos constitui uma medida de segurança essencial no meio industrial, pois vazamentos não identificados de substâncias químicas podem causar perdas de materiais, danos a equipamentos e impactos negativos ao meio ambiente. Segundo Korlapati et al. (2022), diversos métodos são empregados atualmente para a detecção de vazamentos, incluindo técnicas baseadas em pressão, vazão e sinais acústicos. Contudo, os autores destacam que esses métodos apresentam diferentes níveis de complexidade e necessidade de instrumentação, o que evidencia a relevância de alternativas mais simples e acessíveis para o monitoramento de pontos específicos.

Nesse contexto, os sensores colorimétricos se apresentam como uma alternativa vantajosa para a detecção visual de determinadas substâncias. Alberti et al. (2020) destacam que esses sensores podem apresentar baixo custo, facilidade de utilização e potencial para aplicações *in situ*, características relevantes para dispositivos portáteis e descartáveis. Além disso, Martinez et al. (2010) demonstram que o papel pode atuar como suporte para sistemas microfluídicos devido à sua capacidade de absorção e transporte de líquidos por capilaridade, viabilizando análises sem a necessidade de sistemas externos de bombeamento. No presente trabalho, esses princípios são utilizados como base para o transporte do líquido no papel, sem classificar o cartucho conceitual, nesta etapa, como um dispositivo microfluídico.

Além da detecção imediata, a possibilidade de manter um registro de que um vazamento ocorreu pode ampliar a funcionalidade do sistema. Han, Liu e Yin (2014) demonstraram um sensor colorimétrico de memória baseado na desagregação de cadeias de nanopartículas de ouro, cuja alteração óptica persistente permite registrar um estímulo. A partir desses princípios, este trabalho tem como objetivo desenvolver um modelo conceitual de cartucho de baixo custo para a detecção colorimétrica de

vazamentos de líquidos em pontos específicos. A proposta considera um corpo principal reutilizável e uma cápsula sensora descartável, incluindo também o registro do evento por meio de um sistema de memória visual.

Metodologia

O desenvolvimento do modelo conceitual do protótipo foi realizado a partir de pesquisa bibliográfica em artigos científicos sobre sensores colorimétricos, dispositivos microfluídicos baseados em papel e sistemas de detecção de vazamentos. A partir desse levantamento, foram definidos como requisitos do dispositivo o baixo custo, a portabilidade, a facilidade de instalação e a garantia de uma resposta visual. O papel foi escolhido como suporte da região sensora com base em suas propriedades de absorção e transporte de líquidos por capilaridade, além de sua aplicação em diferentes dispositivos analíticos (Martinez et al., 2010; Yang et al., 2017).

Seguindo esses princípios, foi desenvolvida a proposta de um cartucho modular, composto por um corpo principal reutilizável, formado por base de fixação e suporte interno, uma cápsula sensora descartável que comporta o papel reagente e uma tampa transparente. O dispositivo foi planejado para instalação em pontos críticos de sistemas de condução, como válvulas, flanges, conexões e regiões próximas a bombas e tubulações. Suas aberturas laterais possibilitam a entrada do líquido proveniente de um possível vazamento, enquanto a tampa permite a visualização da região sensora. A cápsula intercambiável permite que o papel reagente seja substituído de acordo com o líquido a ser monitorado, possibilitando o uso de diferentes sistemas reagentes em dispositivos colorimétricos baseados em papel (Morbioli et al., 2017).

Conforme a Figura 1, a proposta considera que o cartucho possa ser posicionado em pontos críticos de tubulações, como válvulas, flanges e conexões, de modo que a região sensora possa receber o líquido proveniente de diferentes possíveis direções de vazamento. A forma definitiva de fixação, o posicionamento e a geometria de captação ainda deverão ser definidos e validados na construção física do protótipo.

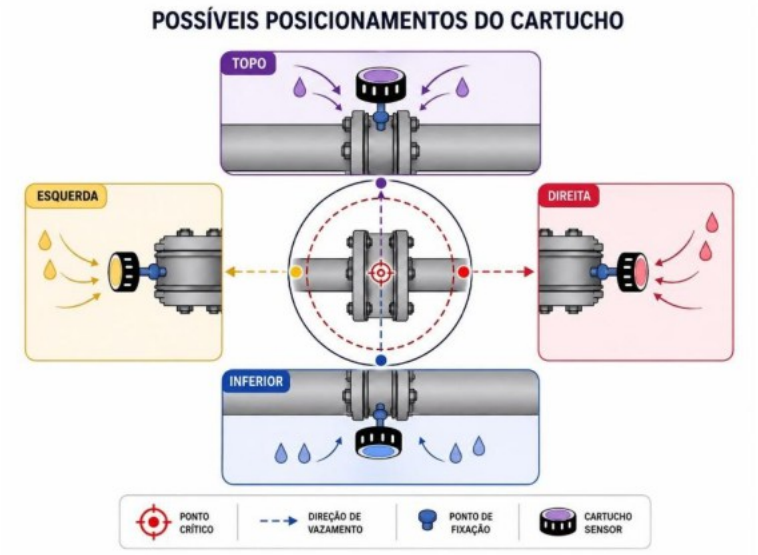


Figura 1 - Representação conceitual de possíveis posicionamentos do cartucho para detecção de vazamentos em pontos críticos.
Fonte: elaboração dos autores (2026). Representação conceitual, ainda não validada experimentalmente.

Na Figura 2, é possível observar a estrutura do cartucho de forma separada, destacando a tampa transparente, o papel reagente, o suporte interno e a base do cartucho. Essa disposição permite compreender como a cápsula sensora fica acomodada no interior do dispositivo e de que forma o líquido pode alcançar a região sensora.



Figura 2 - Estrutura e componentes do cartucho.
Fonte: imagens fornecidas pelos autores (2026).

Na Figura 3, podem ser observados exemplos conceituais de cápsulas intercambiáveis, mostrando que cada cápsula pode conter um papel reagente ajustado à propriedade ou ao analito que se deseja monitorar. Assim, a mesma estrutura pode receber diferentes elementos sensores conforme o uso. As substâncias e cores são ilustrativas: a mudança de cor não identifica, por si só, HCl, NaOH ou outro composto de forma exclusiva; a seletividade dependerá do sistema reagente e de validação.



Figura 3 - Exemplos conceituais de cápsulas intercambiáveis para diferentes líquidos.
Fonte: imagens fornecidas pelos autores (2026). Representação conceitual.

O funcionamento proposto começa quando o líquido de um vazamento alcança o papel reagente, sendo absorvido e conduzido por capilaridade até a região sensora, onde ocorre a reação responsável pela mudança de cor. Essa resposta fornece uma indicação visual da propriedade ou do analito-alvo para o qual o sistema reagente foi desenvolvido, não uma identificação exclusiva da substância apenas pela cor (Jin et al., 2024; Morbioli et al., 2017). Além da detecção imediata do vazamento, o protótipo prevê um segundo compartimento destinado ao registro visual da ocorrência. A proposta toma como referência o princípio de memória colorimétrica demonstrado por Han, Liu e Yin (2014), cujo sistema apresenta alteração óptica persistente após a desagregação de cadeias de ouro. Esse mecanismo não é reproduzido neste estudo. Portanto, não se afirma que a coloração permanecerá por determinado período: o sistema químico da região de memória deverá ser definido e sua estabilidade temporal comprovada experimentalmente.

Na prática, o funcionamento proposto pode ser compreendido em quatro etapas: primeiro, escolhe se a cápsula conforme o líquido a monitorar; em seguida, a cápsula é inserida no cartucho; depois, o cartucho é instalado no ponto desejado; por fim, caso ocorra um vazamento, a mudança de cor indica o contato, enquanto a região de memória é destinada a registro posterior, sujeito à validação.

Como pode ser observado na Figura 4, a proposta considera diferentes respostas de cor antes e após o contato com o líquido. A representação ilustra, de forma conceitual, a hipótese de manutenção da alteração visual após o vazamento. Essa permanência ainda não foi demonstrada e deverá ser avaliada em ensaios de estabilidade ao longo do tempo, após a definição do reagente da região de memória. As cores apresentadas são ilustrativas e não representam sistemas reagentes já validados.



Figura 4 - Representação conceitual de possíveis respostas colorimétricas e do registro permanente do evento. Fonte: imagens fornecidas pelos autores (2026). Representação conceitual, ainda não validada experimentalmente.

Resultados

Com base na pesquisa bibliográfica e no desenvolvimento da proposta, foi estruturado um modelo conceitual de cartucho modular para a identificação de vazamentos, considerando os requisitos de baixo custo, portabilidade e praticidade de instalação. O protótipo foi planejado com um corpo principal reutilizável, formado por base de fixação e suporte interno, cápsula sensora descartável contendo o papel reagente e tampa transparente. Essa estrutura permite que o elemento sensor seja substituído de acordo com o líquido a ser monitorado.

O funcionamento proposto baseia-se na entrada do líquido decorrente de um possível vazamento pelas aberturas do dispositivo e em seu transporte por capilaridade até a região sensora. O contato do líquido com o sistema reagente deverá gerar uma mudança de cor, permitindo a identificação visual direta, sem a necessidade de equipamentos externos na etapa inicial de detecção. A literatura consultada apresenta a capilaridade e as respostas colorimétricas como fundamentos amplamente utilizados em dispositivos analíticos e microfluídicos baseados em papel (Martinez et al., 2010; Morbioli et al., 2017; Yang et al., 2017).

Como diferencial da proposta, foi previsto um segundo compartimento voltado ao possível registro colorimétrico da ocorrência do vazamento. A ideia fundamentase no conceito de memória pela cor descrito por Han, Liu e Yin (2014), em um sistema baseado na desagregação de cadeias de nanopartículas de ouro, capaz de produzir uma alteração óptica persistente. No protótipo proposto, essa seção é tratada como uma região de memória em desenvolvimento, e não como um mecanismo já comprovado. Para que possa registrar o evento após o contato, será necessário definir um sistema químico com resposta estável no papel e avaliar, após a secagem, a estabilidade da cor ao longo do tempo, sob condições experimentais controladas.

De forma geral, o desenvolvimento da proposta resultou na concepção de um dispositivo compacto, modular e visual, com corpo principal reutilizável e cápsula sensora descartável, reunindo em uma única estrutura a detecção do vazamento e a possibilidade de registrar sua ocorrência. As principais características e soluções propostas para o protótipo são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Principais características e soluções propostas para o protótipo.

Característica	**Solução proposta**
Detecção	Resposta colorimétrica
Transporte de líquido	Capilaridade
Elemento sensor	Papel reagente
Estrutura	Corpo principal reutilizável e modular
Manutenção	Cápsula sensora descartável
Visualização	Tampa transparente
Registro do evento	Compartimento de memória
Aplicação	Detecção localizada de vazamentos de líquidos

Fonte: elaboração dos autores (2026).

Discussão

O projeto proposto apresenta potencial como uma alternativa simples, portátil e de baixo custo para a detecção localizada de vazamentos de líquidos. Segundo Jin et al. (2024), sensores colorimétricos apresentam vantagens como resposta visual, portabilidade e baixo custo, características que favorecem aplicações que dispensam instrumentação complexa. Nesse sentido, a proposta associa essas características a uma estrutura voltada especificamente ao monitoramento de pontos críticos de sistemas de condução de líquidos.

Um ponto forte da proposta é a estrutura modular. Malik et al. (2024) destacam a versatilidade dos sensores baseados em papel para a detecção de diferentes analitos, possibilitando ajustes de acordo com a substância analisada. Esse aspecto justifica o uso de cápsulas intercambiáveis no cartucho, permitindo manter a estrutura principal reutilizável enquanto a cápsula sensora e o papel reagente são substituídos. Contudo, cada líquido exigirá um sistema reagente específico e validação experimental futura.

Apesar do potencial apresentado, parâmetros como características do papel, distribuição do líquido, umidade e temperatura podem interferir no sinal colorimétrico. Sensibilidade, seletividade e interpretação da resposta também representam desafios a serem considerados (Jin et al., 2024). Desse modo, será necessário padronizar o material e as condições de exposição em etapas futuras, a fim de avaliar se o dispositivo apresenta resultados confiáveis, consistentes e estáveis.

O compartimento destinado ao registro do vazamento representa o principal diferencial da proposta. Han, Liu e Yin (2014) demonstraram a possibilidade de utilizar alterações ópticas persistentes para registrar um estímulo, sustentando conceitualmente a estratégia de memória colorimétrica. No estudo de referência, esse efeito foi obtido por uma alteração plasmônica associada à desagregação de cadeias de nanopartículas de ouro. Embora o método apresentado pelos autores seja diferente daquele proposto neste trabalho, o estudo serve como base conceitual para o uso de uma resposta visual persistente como forma de registrar a ocorrência de um evento.

Como possibilidade de desenvolvimento futuro, a resposta colorimétrica poderia ser registrada e analisada por meio de smartphones, permitindo seu armazenamento e processamento digital. Mansouri et al. (2025) destacam o potencial dessa associação em dispositivos analíticos baseados em papel. Essa possibilidade, entretanto, não está incluída no modelo conceitual atual, sendo apresentada apenas como uma perspectiva de aprimoramento. Dessa maneira, o projeto reúne detecção colorimétrica, uso de papel, modularidade e possibilidade de registro visual, enquanto sua eficiência e estabilidade ainda deverão ser avaliadas experimentalmente.

Conclusão

Com a realização deste trabalho, foi possível propor um modelo conceitual de cartucho sensor portátil em papel para identificar vazamentos de líquidos por meio da mudança de cor. A partir da

literatura consultada, observou-se que o papel apresenta características de interesse para esse tipo de aplicação, sobretudo por permitir o transporte de líquidos por capilaridade, além de se tratar de um material simples, acessível, de baixo custo e de fácil utilização. O cartucho também pode, em princípio, ser adaptado conforme o líquido que se deseja detectar, o que sugere possibilidade de aplicação em diferentes situações.

A proposta busca ainda que a identificação do vazamento não se limite ao momento em que ocorre, mantendo um registro visual que possa ser consultado posteriormente. A ideia de memória visual foi inspirada no sistema de Han, Liu e Yin (2014), baseado em nanopartículas de ouro, mas o mecanismo a ser empregado neste protótipo ainda precisa ser definido e testado experimentalmente. Ainda assim, o trabalho parece oferecer uma base inicial para o desenvolvimento do dispositivo. Em etapas futuras, serão necessários testes que avaliem sua eficiência, estabilidade e funcionamento em diferentes condições, o que deve contribuir para compreender melhor seu desempenho e verificar sua aplicação prática.

Referências

ALBERTI, G. *et al.* Disposable and low-cost colorimetric sensors for environmental analysis. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 17, n. 22, 8331, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.3390/ijerph17228331. Acesso em: 26 abr. 2026.

HAN, X.; LIU, Y.; YIN, Y. Colorimetric stress memory sensor based on disassembly of gold nanoparticle chains. **Nano Letters**, v. 14, n. 5, p. 2466-2470, 2014. Disponível em: https://doi.org/10.1021/nl500144k. Acesso em: 1 ago. 2026.

JIN, Z. *et al.* Colorimetric sensing for translational applications: from colorants to mechanisms. **Chemical Society Reviews**, v. 53, n. 15, p. 7681-7741, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1039/D4CS00328D. Acesso em: 19 maio 2026.

KORLAPATI, N. V. S. *et al.* Review and analysis of pipeline leak detection methods. **Journal of Pipeline Science and Engineering**, v. 2, n. 4, 100074, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jpse.2022.100074. Acesso em: 3 jul. 2026.

MALIK, S. *et al.* Paper-based sensors: affordable, versatile, and emerging analyte detection platforms. **Analytical Methods**, v. 16, n. 18, p. 2777-2809, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1039/D3AY02258G. Acesso em: 26 abr. 2026.

MANSOURI, S. *et al.* Recent progress of smartphone-assisted paper-based analytical devices (PADs) for multiplex sensing: focusing on colorimetric and optical sensors for environmental monitoring, food safety, and biomedical application. **Microchemical Journal**, v. 209, 112670, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.microc.2025.112670. Acesso em: 19 maio 2026.

MARTINEZ, A. W. *et al.* Diagnostics for the developing world: microfluidic paper-based analytical devices. **Analytical Chemistry**, v. 82, n. 1, p. 3-10, 2010. Disponível em: https://doi.org/10.1021/ac9013989. Acesso em: 3 jul. 2026.

MORBIOLI, G. G. *et al.* Technical aspects and challenges of colorimetric detection with microfluidic paper-based analytical devices (μPADs) - a review. **Analytica Chimica Acta**, v. 970, p. 1-22, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.aca.2017.03.037. Acesso em: 6 ago. 2026.

YANG, Y. *et al.* Paper-based microfluidic devices: emerging themes and applications. **Analytical Chemistry**, v. 89, n. 1, p. 71-91, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1021/acs.analchem.6b04581. Acesso em: 7 jun. 2026.